

Angular distribution measurement of OTR on uneven metal surface

Shusuke Nishiyama*, Nobuyuki Miyamoto, Satoshi Tomioka, Tomoaki Hino
Graduate School of Engineering, Hokkaido University
Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, 060-8628, Japan

Abstract

Optical transition radiation (OTR) is now widely used for beam profile monitoring of high energy accelerators. Because of very sharp angular distribution of OTR for relativistic particle beam, tight alignment for the OTR monitor mechanics and optics is required. To reduce this requirement, we have investigated the angular distribution of OTR for several uneven metallic surfaces and compared with one of an ordinary smooth surface.

粗い金属表面からの遷移放射光の放射角度分布測定

1. はじめに

遷移放射光 (OTR: Optical Transition Radiation) は、高エネルギーの荷電粒子が誘電率の異なる媒質中へ移動する際に媒質の境界面から放射される広いスペクトルをもつ電磁放射で、加速器のビームプロファイルモニタの発光機構としてもしばしば利用されている。

OTR スクリーンには金属の薄膜や箔を用いることが可能で、その場合は入射荷電粒子に局所的に誘起された表面電流による発光のため空間分解能に優れ、さらにピコ秒オーダーの時間分解能を持つことからマイクロパルス単位の時間スケールでの高時間分解能の計測が可能である^[1]。

しかしながら、相対論的な荷電粒子の OTR は非常に鋭い指向性がある。ビームモニタに利用しやすい後方放射 (荷電粒子が真空中から媒質中へ入射する場合の OTR) は、荷電粒子が媒質表面に対して光学的に反射する方向に対する角を θ とすると、OTR の放射強度 I は

$$I \propto \frac{\sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^2}$$

となり^[2]、ローレンツ係数を γ とすると $\theta = 1/\gamma$ 離れた方向に鋭い放射のピークを持ち、 θ が大きくなると急速に強度が低下する。そのため、OTR を利用したモニタの光学系は、蛍光スクリーンを用いたモニタの光学系と比較して大きな開口度と高精度のアライメントが要求される。

個々の荷電粒子による OTR の発生も局所的な現象であるので、スクリーン表面が適度な粗さを持つ場合には微視的には表面がランダムな方向を向くため OTR の放射方向もランダムになり、光学的な拡散反射と同様に OTR の鋭い指向性が緩和されることが期待できる。その一方で、発光強度の低下と表面の粗さによる空間分解能の低下も見込まれる。粗い表面

における OTR の数値シミュレーションによる検討^[3]では、観測する波長と同程度の凹凸で発光角度分布が広がることが示されている。

以前の報告^[4]では、凹凸の分布が規定されている粗さ試験片を用いて OTR 発光角度分布を電子 LINAC で実験的に測定したが、発光角度分布は大きく広がるものの、発光像に表面の粗さによるスペックルが現れていた。今回の報告では、OTR スクリーンにより細かい表面粗さを持たせ、発光角度分布を鏡面状のスクリーンおよび表面粗さの異なるスクリーンで比較した。

2. 実験

2.1 OTR スクリーン

OTR スクリーンは、厚さ 0.5mm の Al 板をバフ研磨で一旦鏡面加工した後直径 $70\mu\text{m}$ のガラスビーズによるブラスト加工をした物を用いた。ブラスト加工の際の吹き付け圧力、処理時間、粒子密度を変えることで、表面に付く加工痕の凹凸の深さや密度を調整し、ブラスト加工後に走査型電子顕微鏡 (SEM) で表面を観察して表面粗さを判断した。

2.2 測定体系

実験は北海道大学の 45MeV 電子ライナックで、エネルギー 45MeV、マクロパルス幅 10ns、1 マクロパルス当たりの電荷量は約 6nC として 1 に示す実験体系で行った。OTR スクリーンは自動回転ステージに垂直に固定し、ビーム軌道上に設置した。また、OTR スクリーンをビーム軌道に対し垂直方向から見込む位置に記録用のデジタルビデオカメラ (SONY DCR-TRV900) を設置した。光学系の焦点距離は 51.6mm、F 値は 2.8 で、レンズの実効直径は 18.4mm である。この状態で OTR スクリーン上での解像度は 0.10mm/pixel となった。

*E-mail: shu@eng.hokudai.ac.jp

experimental setup
(top view)

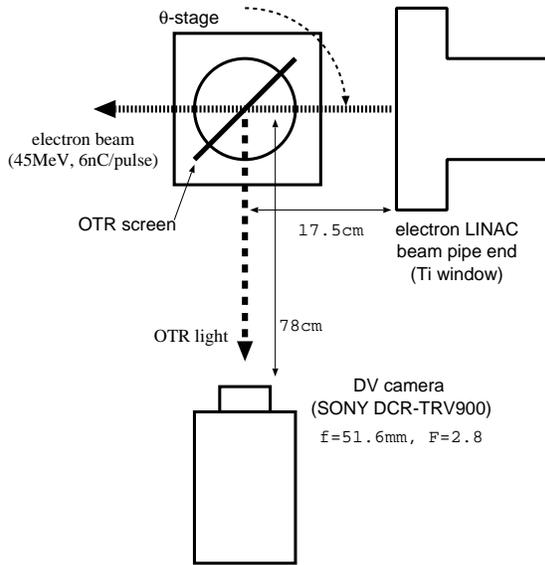


図 1: 実験体系図 (上面図)

3. 結果と考察

3.1 OTR スクリーンの表面

作成した OTR スクリーン試料の SEM 写真を図 4 に示す。試料 (A) はバフ研磨のみを行ったのスクリーンで、浅い研磨痕が残っているが、目視では鏡面状態になっている。試料 (B) から (E) はブラスト処理を行ったスクリーンで、(B) が最も吹き付け時の粒子密度が高く、(C), (D), (E) の順に粒子密度を低くしてブラスト処理を行った。

SEM 写真からブラスト加工痕の平均的な直径 D を求め、表面粗さの指標とした。加工痕の半径を $R = D/2$ 、ガラスビーズの半径を $r = 70\mu\text{m}$ とすると、加工痕の深さ h は $h = r - \sqrt{r^2 - R^2}$ で求められる。また、面の巨視的な法線方向に対する局所的な法線がなす角度の代表値 θ として $\theta = \tan^{-1} h/R$ を用いた。 D , h は図 4 中に示し、 θ は図 3 の横軸で用いた。

3.2 OTR の発光像

図 1 の実験体系で、試料 (A) から (E) のそれぞれについて電子ビームを照射しながら発光像が最も明るくなるように OTR スクリーンの角度を調整した場合の発光像を図 5 に示す。鏡面である試料 (A) の発光像は非常に明るいため、ND フィルタで 1/16 に減衰させてある。粗面になっている試料 (B) から (E) では、(A) と比較して発光像の輝度が 1/50 程度に低下しているが、(B) から (E) における表面粗さの違いによる輝度の変化は少ない。サンドブラスト処理による粗面を用いた場合には OTR の発光像にスペックルが生じていたが、今回の実験ではスペックルは見られなかった。これは、ブラスト処理にガラスビーズを用いたことで加工痕が球面となり、処理後には特定方

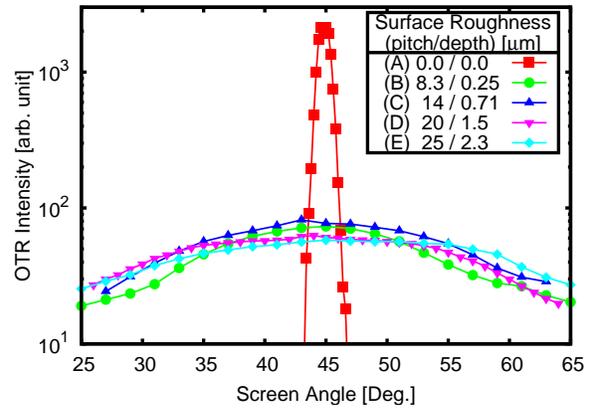


図 2: 発光像輝度のスクリーン回転による変化

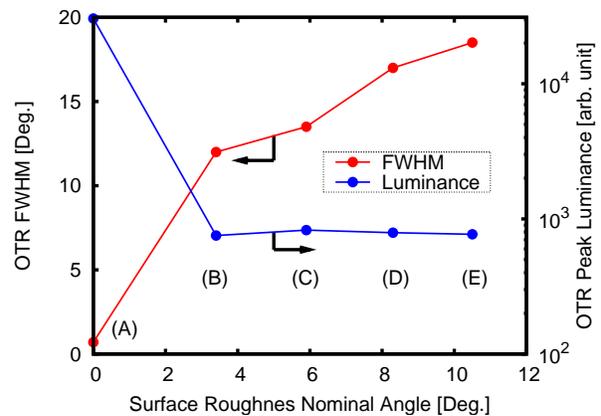


図 3: 表面粗さによる輝度と放射角度分布の FWHM の違い

向へ OTR を放射する微小な平面とならなかったためと思われる。

3.3 放射角度分布の比較

OTR の放射角度分布を比較するために、試料 (A) から (E) のそれぞれについて電子ビームに対する OTR スクリーンの角度を変化させながら発光像を記録し、OTR の輝度をプロットしたグラフが図 2 である。横軸は OTR スクリーンの法線が電子ビーム軌道となす角で、45 度のときに鏡面での OTR がビデオカメラの方向へ放射される。縦軸は発光像の中心の輝度 (任意単位) を対数目盛で示した。

鏡面である試料 (A) では OTR の鋭い指向性のため、スクリーンの角度が 45 度から離れると急激に輝度が低下し、 ± 1 度の回転で約 1/30 になった。それに対し、粗面の試料 (B) から (E) では、スクリーンを ± 5 度回転させても輝度の低下は 10% 程度であり、鏡面に比べて広い範囲にわたって OTR が放射されている。

図 2 より、試料 (A) から (E) の放射角度分布の半値全幅と発光像の輝度を求めた結果を表 1 と図 3 に示した。図 3 の横軸は、表 1 に示した粗面の局所的な法線方向の角度の代表値 θ で、OTR スクリーン表面の粗さが粗くなり θ が大きくなると放射角度分布の

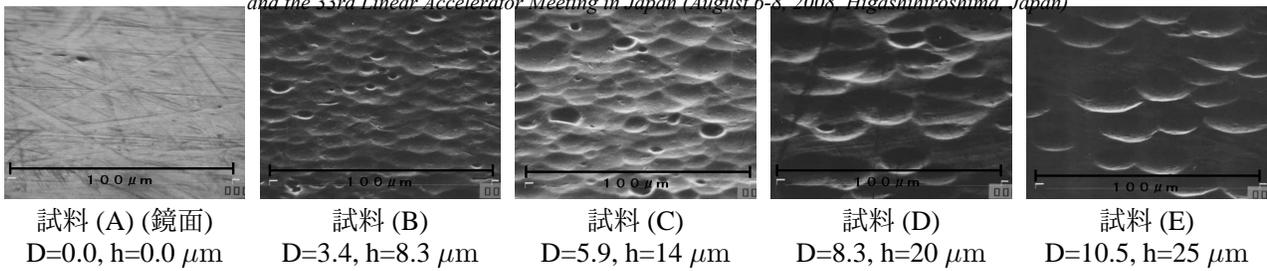


図 4: OTR スクリーン表面の SEM 画像

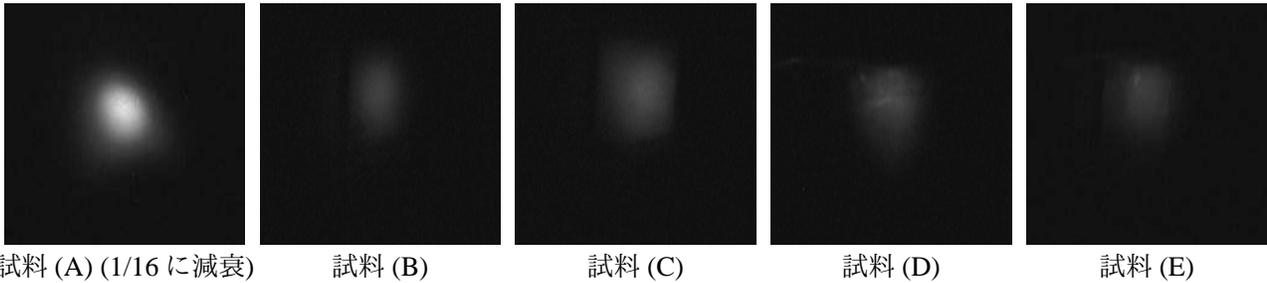


図 5: 電子ビームによる OTR 発光像

半値幅が増加する傾向を示した。一方で発光像の輝度は表面粗さの異なる試料(B)から(E)では大きくは変わらなかった。

4. まとめ

ガラスビーズによるブラスト処理で種々の表面粗さを持つ粗面を作成し、OTRの放射角度分布を鏡面および表面粗さの異なる粗面で比較した。今回用いた、表面方向に10μmオーダーの粗さを持つ金属表面でのOTRは、鏡面の場合に比較して放射角度分布が大きく拡がり、観測方向が1度程度変わっても影響が少ないといえる。また、放射角度分布の拡がり方は表面の粗さが大きくなるとより拡がる傾向を示した。粗面では鏡面に比べてOTRの発光輝度が1/50程度に低下するが、今回用いた表面粗さの範囲では粗さの違いによる輝度の差は少なかった。

参考文献

- [1] A. H. Lumpkin, M. D. Wilke, "Time-resolved electron-beam characterizations with optical transition radiation", Nucl. Instr. and Meth. A331, 803-808, 1993
- [2] L. Wartski et al., "Interference phenomenon in optical transition radiation and its application to particle beam diagnostics and multiple-scattering measurements", J. Appl. Phys., 46, 3644-3653, 1975
- [3] S. Reiche, J. B. Rosenweig, "Transition Radiation for Uneven, Limited Surface", Proceedings of the PAC2001, 1282-1284, 2001
- [4] S. Nisiyama et al., "Experimental study of OTR on uneven metallic surface", Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, 477-479, 2005